Aus dem Anatomischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. W. Graumann

Dickenabweichungen bei Mikrotomschnitten und ihre Ursachen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Hans Jasper Feneis
aus München

1970

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41543901_0091

Aus dem Anatomischen Institut der Universität Tübingen
Direktor: Professor Dr. med. W. Graumann

Dickenabweichungen bei Mikrotomschnitten und ihre Ursachen

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin

dem Fachbereich Theoretische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Hans Jasper Feneis
aus München

1970

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. K. Mörike

Berichterstatter: Professor Dr. W. Graumann

FOTODRUCK PRÄZIS Barbara v. Spangenberg KG · Tübingen

Inhaltsangabe

	Seite
I. Einführung	1
II. Material und Methodik	4
Eigene Untersuchungen	4
III. Objektseitige Ursachen	6
1. Konsistenz des Objektes	6
2. Objektbreite	6
3. Material des Einspannblocks	8
IV. Mikrotomseitige Ursachen	9
1. Festliegende Faktoren	9
a) Ganggenauigkeit der Objektförderung	9
b) Präzision der Schlittenführung	11
c) Messerhalterung	11
d) Verformungsfestigkeit des Mikrotoms	13
2. Beeinflußbare Faktoren	15
a) Schnittdickeneinstellung am Fördermechanismus	15
b) Schneidgeschwindigkeit	16
c) Schnittwinkel	17
d) Einstellwinkel (Quer- oder Schrägmesser)	18
e) Schmierung	19
V. Messerseitige Faktoren	21
1. Stabilität und Schliffart des Messers	21
2. Messerschärfe	21
VI. Durch den Zerspanungsvorgang direkt bedingte Ursachen	22
Schnittstauchung - Schnittverdickung	22
VII. Umweltbedingte Ursache, Temperatur	24
VIII. Schnittserien	24
IX. Zusammenfassung	29
X. Literaturangaben	31

I. Einführung

Quantitative Untersuchungsmethoden in der Histologie und ihren verwandten Gebieten setzen eine zuverlässige Maßhaltigkeit der Schnitte voraus. In diesem Zusammenhang ist es überraschend, daß über die Fehlerbreite der Schneidergebnisse kaum etwas bekannt ist. Aufgabe der folgenden Arbeit soll es sein, die Abweichungen der Schnittdicken von den am Mikrotom eingestellten Werten zu erfassen und Ursachen der Schnittdickeninkonstanz zu ermitteln.

Es ist eine alte Erfahrung, daß nach Anschneiden eines Objektes mit mehreren sehr dünnen Schnitten ein darauffolgender, gewünschter dicker Schnitt erheblich stärker ausfällt, als dem eingestellten Objekthub entspricht. Geht man der Frage nach, wodurch dieses Übermaß zustandekommt, so bleiben nach Ausschluß eines Fehlers in der Objektförderung des Mikrotoms folgende Erklärungsmöglichkeiten:

1.) Die zusätzliche Schnittdicke ist durch die Schnittstauchung bedingt. Diese Frage läßt sich durch vergleichende Messung von Objekt- und Schnittfläche klären: Man kommt dabei zu dem Ergebnis, daß nur ein geringer Teil des Übermaßes auf die Schnittverdickung durch Stauchung zurückzuführen ist.

2.) Messer und Objekt haben sich während des Schneidvorgangs einander genähert. Eine Verformung des Messers, des Objekts und der entsprechenden Halterungen kann nach Ausschluß von Temperatureinflüssen nur mit Kräften erklärt werden, welche beim Schneiden auftreten. Um über diese Kräfte Aufschluß zu erhalten, ist es naheliegend, einen Vergleich mit der spanabhebenden Verformung von Metallen beim Maschinenbau zu ziehen. "Das Schneiden" mit dem Mikrotom ist technologisch gesehen ebenfalls eine Zerspanung, welche hier allerdings einige Besonderheiten aufweist insofern, als die Schneidgeschwindigkeit meist niedriger liegt und das Material des "Werkstücks" relativ weich ist. Außerdem stellt beim Mikrotomschneiden der abgehobene Schnitt das erwünschte Fertigprodukt dar, während der Span bei der technischen spanabhebenden Verformung ein Abfallprodukt ist.

Während der Zerspanung wirken im wesentlichen die folgenden Kräfte auf die Messerschneide ein: Wenn das Messer in den Block eindringt, so setzt dieser dem Messer einen Widerstand entgegen, der ent-

gegengesetzt zur Schnittrichtung verläuft. (Fz in Abb. 1). Außer dieser als Hauptschnittkraft Fz bezeichneten Kraft entsteht eine weitere - senkrecht zur oberen Schneidfacette verlaufende - objektwärts gerichtete Teilkraft Fy, welche im folgenden als Ablenkkraft bezeichnet wird. Beide Kräfte zusammen addieren sich zu einer resultierenden Schnittkraft F, welche als Drehmoment über den Hebelarm r um eine gedachte Achse in der Messerhalterung auf die Messerschneide einwirkt und bestrebt ist, diese in Richtung auf das Objekt zu verlagern.

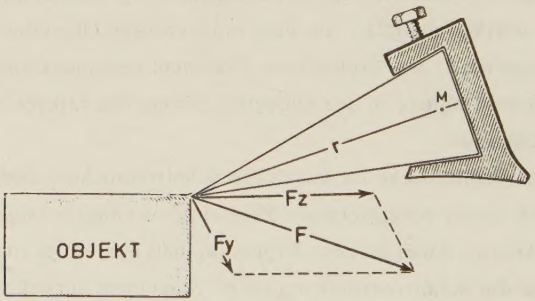

Abb. 1. Die beim Eindringen des Messers in das Objekt auftretenden Kräfte:
F_z: Hauptschnittkraft
F_y: Ablenkkraft
F : Resultierende Schnittkraft
M : Gedachte Drehachse des objektwärts abweichenden Messers.

Ursache der Schneidkräfte ist der Scherwiderstand des Objektmaterials. Nach PII SPANEN, zitiert aus einer unveröffentlichten Arbeit von Jerusalem, werden bei der Schnittbildung dünne Lamellen gebildet, welche in der Scherzone (s. Abb. 2) aus der Schneidebene herausgeschoben werden und damit gleichzeitig auf die obere Schneidfacette aufgleiten. Der Widerstand, welcher vom Objektmaterial dieser Strukturveränderung entgegen-

gesetzt wird, tritt als Scherwiderstand in Erscheinung.

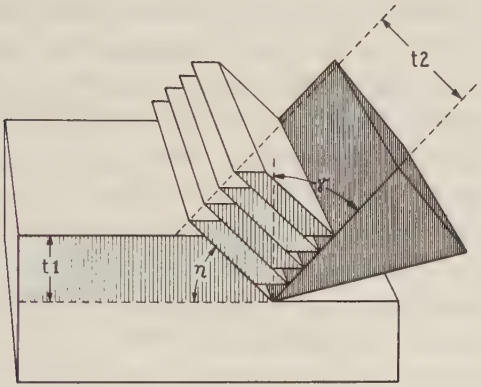

Abb. 2 . Vorgang der Schnittbildung nach PIISPANEN : Entlang der Scherzone A-B werden dünne Objektlamellen aus der Schneideebene herausgehoben.

t_1 : eingestellter Objekthub

t_2 : Dicke des abgehobenen Schnittes

γ: Spanwinkel

η : Scherwinkel

Nach diesen Betrachtungen ist es naheliegend, die Wirkung der Ablenkkraft auf das Messer für den Schnittdickenzuwachs verantwortlich zu machen. Hinzukommt aber, daß derselbe Kraftbetrag, der die Messerschneide objektwärts bewegt, nach dem dritten NEWTONschen Axiom auch das Objekt messerwärts zieht, so daß sich Messerverbiegung und zusätzlicher Objekthub bezüglich der Schnittdickenzunahme addieren. Im folgenden soll experimentell geprüft werden, in welchem Umfang einzelne Faktoren (s. Übersicht Seite 5) das Ausmaß der Messerablenkung und des Objekthubs beeinflussen.

II. Material und Methodik

Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden mit Ausnahme des Versuchs III 1. Seite 6 Blöcke aus 16 %igem Celloidin-Paraffin hergestellt nach ROMEIS, 16. Aufl. 431. 3 und 448 ohne eingebettetes Objekt geschnitten. Die Untersuchungen wurden an folgenden Mikrotomen durchgeführt: JUNG-Tetrander I und II, JUNG-MINOT 1120mot, LEITZ-Grundschlittenmikrotom und LEITZ-MINOT-Mikrotom. Vor jedem Schnitt wurde mit 1 µ-Schnitten eine in Schneidebenenhöhe liegende Objektoberfläche geschaffen. Die Messung der resultierenden Schnittdicke, sowie der Messer- und Objektverformung erfolgte mit dem elektronischen Längenmeßgerät "Millitron" der Firma Carl Mahr, Esslingen. Wenn es darauf ankam, fortlaufende Messungen direkt zu registrieren, wurde der elektrische Schnellschreiber "Helcoscriptor" an das Millitrongerät angeschlossen. Um vergleichbare mechanische Voraussetzungen zu schaffen, erfolgte der Antrieb nicht von Hand, sondern mit einem Elektromotor (Mikrotom-Antriebsmotor der Firma JUNG), welcher mit geringen Änderungen an die verschiedenen Mikrotome angepaßt werden konnte. Geschnitten wurde mit 9 verschiedenen Messern, deren Daten in Tabelle I zusammengefaßt sind.

Nr.	Typ	Klingenwinkel	Rückenstärke in mm	Klingenbreite in mm	Länge in mm
1	a	12°	7	28	150
2	a	14°	9	30,6	165
3	a	16°	13	33	242
4	b	12°	7,7	31	175
5	c	16°	9,3	33	210
6	c	24°	13	33	240
7	d	34°	10,8	36	160
8	d	25°	12	36	237
9	d	34°	10,9	36	160

Tabelle 1. Liste der verwendeten Messer

Die zu den einzelnen Versuchen angegebenen Werte stellen, wenn nicht anders vermerkt, die typischen Ergebnisse eines Versuchs und nicht den Durchschnitt aus vielen Versuchen dar.

Eigene Untersuchungen

Aufgrund allgemeiner Laborerfahrung und einer Reihe von Vorversuchen kommen als Einflußmöglichkeiten auf die Schnittdickenabweichung folgende Faktoren in Betracht:

Objektseitige Ursachen:

1. Konsistenz des Objektes
2. Objektbreite
3. Material des Einspannblocks

Mikrotomseitige Ursachen:

1. Festliegende Faktoren
   a) Ganggenauigkeit der Objektförderung
   b) Präzision der Schlittenführung
   c) Messerhalterung
   d) Verformungsfestigkeit des Mikrotoms
2. Beeinflußbare Faktoren
   a) Schnittdickeneinstellung am Fördermechanismus
   b) Schneidgeschwindigkeit
   c) Schnittwinkel
   d) Einstellwinkel (Quer- oder Schrägmesser)
   e) Schmierung

Messerseitige Faktoren:

1. Stabilität und Schliffart des Messers
2. Messerschärfe

Durch den Zerspanungsvorgang direkt bedingte Ursachen:

Schnittstauchung - Schnittverdickung

Umweltbedingte Ursache:

Temperatur

III. Objektseitige Ursachen

1. Konsistenz des Objektes

Entscheidend für die Größe der Ablenkkraft ist der Scherwiderstand des Objektmaterials, welcher sich in der Praxis aus der Konsistenz von eingebettetem Gewebe und Einbettungsmittel ergibt. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurde bei den folgenden Versuchen, wie schon gesagt, bewußt auf die Einbettung von Gewebe verzichtet. Folgende Einbettungsmittel wurden untersucht: Paraffin Smp 52°, Paraffin Smp 70°, Paraplast und 16 %iges Celloidin- Paraffin. Von diesen Materialien wurden jeweils 10 mm breite Blöcke angefertigt und unter gleichen Bedingungen (Schneidgeschwindigkeit, Messerwinkel usw.) geschnitten, wobei die Messerablenkung an der Schneide gemessen wurde. Die Ergebnisse bei verschiedenem Objekthub (eingestellte Schnittdicke am Mikrotom) sind in Tabelle II wiedergegeben.

Objekthub	5 µ	10 µ	20 µ	40 µ
Paraffin Smp 52°C	0,03	0,11	0,3	0,6
Paraffin Smp 70°C	0,04	0,14	0,33	0,65
Paraplast	0,04	0,15	0,35	0,7
Paraffin-Celloidin 16 %	0,45	0,88	1,76	3,5

Tabelle 2. Die Abhängigkeit der Messerablenkung vom eingestellten Objekthub in µ bei verschiedenen Einbettungsmitteln

Wie man sieht , ist die Ablenkung für Celloidin- Paraffin entsprechend seiner größeren Festigkeit meist etwa 6mal größer als bei Paraffin oder Paraplast. Die Unterschiede zwischen den einzelnen Paraffinarten hingegen sind gering.

2. Objektbreite

Um den Einfluß der Objektbreite auf die Messerverformung zu ermitteln, wurde auf dem Mikrotom-Tetrander I ein quadratischer Paraffin-Celloidinblock von 12 mm Kantenlänge bei 45° Schrägstellung[+] befestigt und

[+]) Einen ähnlichen Versuch mit etwas anderer Fragestellung hat schon JERUSALEM gemacht.

mit quereingespanntem Messer Typ a (Nr. 3 in Tab. 1) geschnitten, wobei der Abstand der Messerhalter und somit die freie Messerlänge mit 120 mm bewußt groß gehalten wurde. Der Objekthub war auf 20 µ eingestellt, die Schneidgeschwindigkeit betrug 1 cm pro Sekunde. Das Stativ des Meßtasters war auf dem Messerhalterträger montiert, so daß die reine Messerverformung unbeeinflußt durch die Verformung anderer Mikrotomteile gemessen werden konnte. Die Meßtasterspitze war möglichst dicht an der Messerschneide unmittelbar neben dem aufgleitenden Schnitt aufgesetzt ; die Ausschläge registrierte der Schnellschreiber bei einer Schreibgeschwindigkeit von ebenfalls 1 cm pro Sekunde. Auf der Ordinate entsprechen 1 cm des Millimeterpapiers 1 µ Auslenkung der Meßtasterspitze. Wie man der Abbildung entnehmen kann, liegt der Beginn des Schneidvorgangs bei A, das Messer wird nun mit zunehmender Schnittbreite immer weiter objektwärts gedrängt, bis es bei B die volle Objektdiagonale von ungefähr 1,7 cm erfaßt hat. An dieser Stelle beträgt die Messerablenkung 2,3 µ.

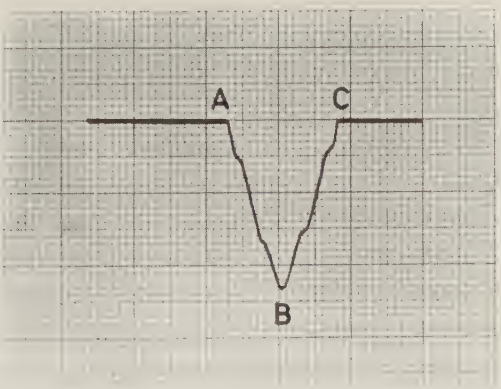

Abb. 3 Abhängigkeit der Messerablenkung von der Objektbreite. Direktschreiberdiagramm beim Durchgang eines Quermessers durch einen diagonal eingespannten quadratischen Block. Die Objektbreite steigt von 0 (A) bis zu 17 mm(B) und geht wieder auf 0 (C) zurück. Die Messerablenkung variiert entsprechend von 0 - 2,3 µ.

Anschließend geht die Ablenkung des Messers mit abnehmender Objektbreite wieder zurück, bis bei C am Objektende das Messer in seine Ausgangslage zurückkehrt. Entsprechend betrug die anschließend gemessene

Schnittdicke an den Ecken (A und C) 20 µ und nahm in Richtung auf die schneidenparallele Objektdiagonale (B) stetig bis auf 25 µ zu. Hier sind also bei einem Schnittdickenübermaß von 5 µ, 2,3 µ durch die reine Messerverformung bedingt, während die übrigen 2,7 µ auf andere Faktoren (u.a. zusätzlicher Objekthub und Stauchung) entfallen, welche später noch erörtert werden.

Aus dem Diagramm kann man auf eine direkte Proportionalität zwischen Objektbreite und Messerablenkung schließen.

3. Material des Einspannblocks

Wie bereits erwähnt, (S. 2, 3) wirkt sich die Ablenkkraft F y (Abb. 1) nicht nur in einer objektwärts gerichteten Messerverformung, sondern in umgekehrter Richtung auch in einem messerwärts gerichteten zusätzlichen Objekthub aus. Wie weit nun das Objekt beim Schneiden in Richtung auf die Messerschneide verlagert wird, hängt außer von der Ablenkkraft F y noch vom Elastizitätsmodul und den Maßen des Objekts und des Einspannblocks ab, wobei die Nachgiebigkeit des Objekthalters mit seinem Unterbau hier zunächst außer acht gelassen sei. Wie groß der Unterschied zwischen Holz und Plexiglas als Aufspannblockmaterial ist, soll der folgende Versuch zeigen:

Ein Celloidin- Paraffinobjekt von 17 mm Breite wurde auf einem Hartholzblock von 20 x 20 x 44 mm montiert und mit 10, 20 und 40 µ Vorschub geschnitten. Anschließend wurde dasselbe Objekt auf einem Plexiglasblock der gleichen Abmessungen befestigt und ebenso geschnitten. Der Versuch wurde auf dem Mikrotom Tetrander I mit einem d-Messer durchgeführt, die Schneidgeschwindigkeit betrug 1 cm pro Sekunde. Die Ergebnisse der Schnittdickenmessung sind im folgenden Diagramm (Abb. 4) festgehalten, wobei auf der Abszisse der Objekthub (= Vorschub) in µ und auf der Ordinate das Schnittdickenübermaß in µ eingetragen ist. Man ersieht aus diesem Diagramm, daß das Schnittdickenübermaß bei Verwendung von Plexiglas als Aufspannblockmaterial um 10 % geringer ausfällt als bei Hartholz. Die Konsequenz aus dieser Beobachtung sollte darin bestehen, die Objekte möglichst direkt auf einen metallischen Objektträger aufzukitten, um Fehler durch die elastische Nachgiebigkeit des Aufspannblocks möglichst klein zu halten.

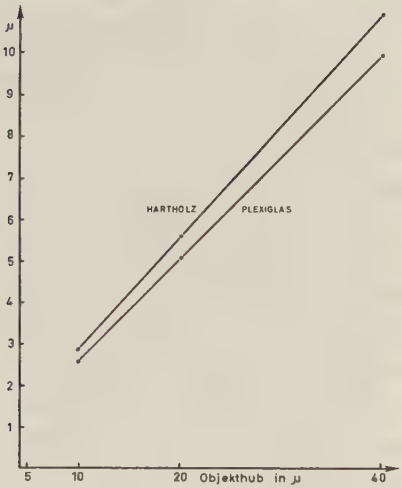

Abb. 4. Einfluß des Einspannblockmaterials auf die resultierende Schnittdicke bei verschiedenem Objekthub. Auf der Abszisse: Vorschub in u, auf der Ordinate: gemessenes Schnittdickenübermaß in u.

IV. Mikrotomseitige Ursachen

1. Festliegende Faktoren

a) Ganggenauigkeit der Objektförderung

Mißt man die Ganggebauigkeit des Objekthubs bei verschiedenen Mikrotomen, so stellt man fest, daß ein Fehler von $\pm$ 5 % des eingestellten Vorschubs kaum unterschritten wird. Bei genauerer Untersuchung konnte jedoch beobachtet werden, daß der Objekthalter nach erfolgtem Objekthub nicht sofort auf den eingestellten Wert angehoben wurde, sondern diesen Wert erst nach einiger Zeit erreichte. Diese "Objekthubverzögerung" ist in den folgenden Schnellschreiberdiagrammen graphisch dargestellt.

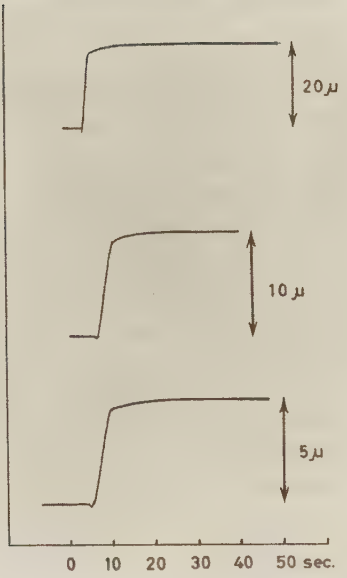

Abb. 5 . Die zeitliche Verzögerung des Objekthubs. Abszisse : Zeit 1 mm = 1 Sekunde. Ordinate : tatsächlicher Objekthub in µ .

Die Diagramme wurden am LEITZ-MINOT-Mikrotom abgenommen. Bei Einstellung auf 5µ Objekthub z. B. erfolgte zunächst nur eine Förderung um 4,4µ , der volle Wert von 5µ wurde erst nach einer Verzögerung von 21 Sekunden erreicht. Für 10µ Objekthub betrugen die entsprechenden Meßergebnisse 9µ und 20 Sekunden, für 20µ Vorschub 18µ und 25 Sekunden. Der gemessene Objekthub lag also zunächst jeweils um 10 % unter dem eingestellten Wert und erreichte sein Sollmaß erst nach einer Verzögerung von ca. 20 Sekunden. Für die Praxis ergibt sich aus dieser Beobachtung die Forderung nach gleichen Zeitintervallen jeweils zwischen Objekthub und Schneidbeginn, sowie zwischen den einzelnen Schnitten einer Serie. Werden diese Voraussetzungen erfüllt, so gleicht sich die jeweilige Objekthubverzögerung mit derjenigen des vorhergehenden Schnittes aus, so daß bei Schneidbeginn das Objekt tatsächlich um den eingestellten Objekthub - bezogen auf den vorherigen

Schnitt - gefördert wird, wenn nicht die Passage Block - Messer bei der Rückkehr zur nächsten Ausgangsstellung ein neues Störmoment bringt.

b) Präzision der Schlittenführung

Zum Sichtbarmachen von Unebenheiten in den Schlittenbahnen der Mikrotome wurde ein indirektes Meßverfahren angewandt: Ein ebenes Glasendmaß wurde genau parallel zur Schlittenbahn auf den Schlitten montiert und mit diesem unter dem feststehenden Meßtaster durchgefahren. Um einen schmierungsbedingten Fehler zu vermeiden, lag die Meßstrecke stets mindestens 10 cm vor dem Startpunkt des Schlittens. Die durch die Bahnunebenheiten bedingten Vertikalbewegungen des Schlittens konnten auf diese Weise am Anzeigegerät abgelesen bzw. mit dem Schnellschreiber direkt aufgezeichnet werden. Es zeigte sich, daß die Vertikalschwankungen des Mikrotomschlittens bis zu $\pm$ 2 μ bezogen auf die Mittellage des Schlittens betrugen. Höchstens auf kurzen Bahnabschnitten von wenigen Millimetern Länge konnten einmal Werte unter $\pm$ 0,5 μ gemessen werden. Diese Ergebnisse gelten für das LEITZ-Grundschlittenmikrotom und für die Mikrotome Tetrander I und II nach mehrjährigem Gebrauch.

Allerdings dürften sich diese Fehler in der Schlittenbahn auf die Schnittdickenresultate in einer laufenden Serie nicht auswirken, weil sie bei jedem Schnitt naturgemäß gleichgerichtet sind und somit lediglich innerhalb der Einzelschnitte eine entsprechende Niveauverschiebung gegenüber einer schlittenbahnparallelen Ebene bedingen.

c) Messerhalterung

Von entscheidendem Einfluß auf die Schnittdicke ist die Art der Messerhalterung. Ein einseitig eingespanntes Messer kann je nach seiner Eigenstabilität und freien Messerlänge, wie Versuche gezeigt haben, in ungünstigen Fällen bis zu 100 % des eingestellten Objekthubs zusätzlich durchfedern. Im folgenden Diagramm ist das Verhalten eines a-Messers (Nr. 3, Tab. 1) bei verschiedenen freien Messerlängen zwischen den beiden Messerhaltern aufgetragen. Auf dem Mikrotom Tetrander I wurde ein 10 mm breiter Celloidin-Paraffinblock mit einer Schneidgeschwindigkeit von 1 cm pro Sekunde bei einem Schnitt winkel von 28° (s.S.17) geschnitten. Das Stativ des Meßtasters wurde auf dem Messerhalter befestigt, die Ablenkung

wurde an der Messerschneide direkt neben dem Objekt gemessen. Man sieht, daß sich im untersuchten Bereich die Ablenkung der Messerschneide beim Schneiden etwa proportional zur freien Messerlänge verhält.

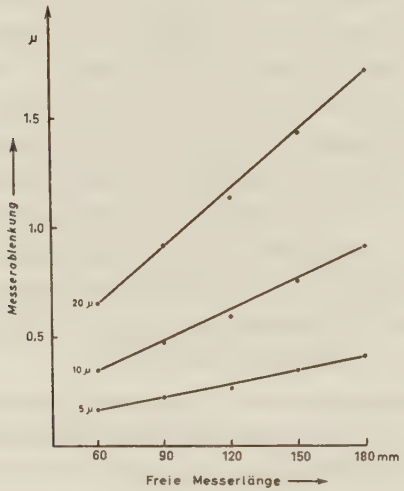

Abb. 6. Beziehung zwischen Messerablenkung und freier Messerlänge eines a-Messers (Nr. 3, Tab. 1) bei verschiedenem Objekthub.

In einem weiteren Versuch wurde am LEITZ-Grundschlittenmikrotom die Auslenkung verschiedener Messer entgegen der Vorschrift bei einseitiger Messereinspannung von der Mikrotombasis aus gemessen, zum Vergleich wurden die entsprechenden Werte bei doppelseitiger stabiler Messerhalterung am LEITZ-MINOT-Mikrotom ermittelt. Die Ergebnisse sind im folgenden Diagramm (Abb. 7) enthalten. Wie man den Werten entnehmen kann, beträgt bei dieser Versuchsanordnung die Messerablenkung am LEITZ-MINOT-Mikrotom weniger als 1/10 der entsprechenden Werte am LEITZ- Grundschlittenmikrotom.

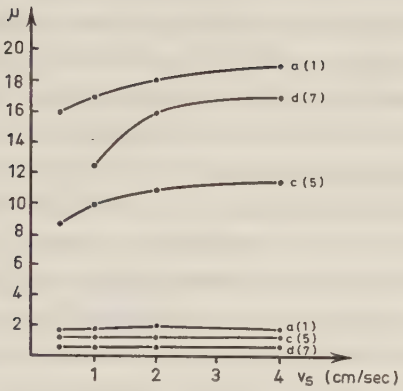

Abb. 7 . Ablenkung des Messers (Ordinate) bei verschiedenen Schneidgeschwindigkeiten (Abszisse). Obere Kurvenschar am LEITZ-Grundschlittenmikrotom bei einseitiger (!) Messereinspannung und einer freien Messerlänge von 77 mm. Untere Kurvenschar beidseitige Messereinspannung am LEITZ-MINOT-Mikrotom. Freie Messerlänge 77 mm. Objekthub in beiden Fällen 20 µ . Die Buchstaben bezeichnen die Messertypen, die Zahlen die Nr. in Tab. 1.

Bei diesem Versuch geht allerdings ein erheblicher Teil der Gesamtauslenkung des Messers auf Kosten der Messerhalterung und ihres Unterbaues. Beim Schneiden mit 20 µ Objekthub kippte beispielsweise bei einseitig eingespanntem Messer der Messerhalterträger am LEITZ-Grundschlittenmikrotom um 1,2 µ nach innen. Dieser Versuch sagt nichts über die normale Leistung des Mikrotoms aus, das ja für beidseitige Messereinspannung konstruiert ist.

d) Verformungsfestigkeit des Mikrotoms

Eine stabile Messerhalterung kann bezüglich der Schneidresultate nur zum Tragen kommen, wenn die Schneidkräfte nicht andere Teile des

Mikrotoms verformen und dadurch Objekt und Messer einander nähern. Diese Verformung kann einmal in einer nicht genügend stabilen Verankerung des Messerhalters ihren Grund haben, zum anderen kann auch der Objekthalter und sein Unterbau nachgeben. So fällt auf, daß am LEITZ-MINOT-Mikrotom trotz der vergleichsweise sehr geringen Messerablenkung das Schnittdickenübermaß deutlich über den Werten lag, welche beim Tetrander II gemessen wurden. Eine Erklärungsmöglichkeit in diesem speziellen Fall besteht darin, daß beim LEITZ-MINOT-Mikrotom mit seiner vertikalen Schlittenbahn die Schwerkraft des Schlittens der Ablenkkraft nicht entgegenwirken kann, wie es bei den übrigen untersuchten Mikrotomen der Fall ist. Die Schwalbenschwanzführung, die diese Aufgabe übernehmen sollte, kann offenbar eine so präzise Schlittenführung nicht gewährleisten. Eine Bestätigung für diese Vermutung konnte dadurch erbracht werden, daß sich das Schnittdickenübermaß verringerte, wenn man das LEITZ-MINOT-Mikrotom auf die Rückseite legte, so daß die Schlittenbewegung horizontal in derselben Weise wie bei den übrigen Konstruktionen erfolgte.

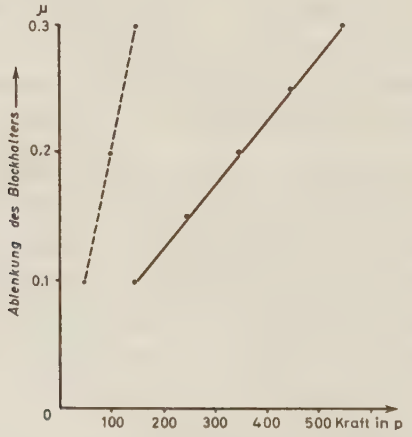

Abb. 8. Weg-Kraft-Diagramm, abgenommen am Objekthalter des LEITZ-MINOT-Mikrotoms. Einmal bei normaler, vertikaler Schlittenbahn (durchgezogene Linie). Dann bei horizontaler Schlittenbahn (gestrichelte Linie).

Um diese Verhältnisse graphisch darzustellen, wurde der Objekthalter in beiden Fällen mit einer Federwaage senkrecht zur Schneidebene messerwärts gezogen, wobei die der jeweiligen Kraft entsprechenden Bewegungen des Objekthalters registriert wurden. Ein Vergleich der beiden Diagramme (Abb. 8) zeigt, daß der Schlitten bei liegendem Mikrotom bei gleicher Ablenkkraft nur halb so weit messerwärts gezogen wird, wie bei normal stehendem Mikrotom. Man kann also hieraus schließen, daß der durch den Schneidprozeß bedingte zusätzliche Objekthub bei einem vertikal laufenden Schlitten eine Annäherung des gesamten Schlittens an die Schneidebene bewirkt, während bei horizontal laufendem Schlitten der zusätzliche Objekthub seine Ursache nur in einer elastischen Verformung von Schlitten und Objekthalter haben kann, wenn, wie im vorliegenden Fall, die Ablenkkraft geringer als die Schwerkraft des Schlittens ist.

2. Beeinflußbare Faktoren

a) Schnittdickeneinstellung am Fördermechanismus

Mißt man die Messerablenkung bei verschiedenem Objekthub unter sonst gleichen Bedingungen, so ergibt sich eine deutliche Proportionalität zwischen Messerablenkung und eingestelltem Objekthub, wie aus dem folgenden Diagramm (Abb. 9) ersichtlich.

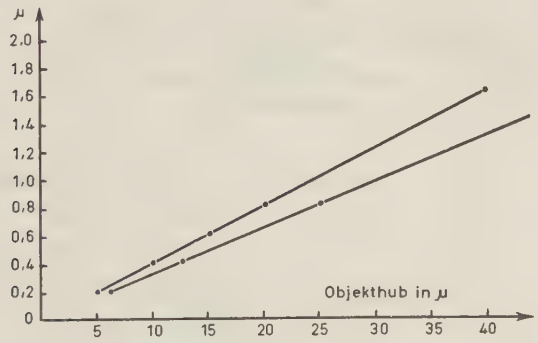

Abb. 9. Zusammenhang zwischen Messerablenkung (Ordinate), eingestelltem Objekthub und Schnittdicke. Näheres s. Text.

Die Untersuchung erfolgte am LEITZ-MINOT-Mikrotom, es wurde mit einem c-Messer (Nr. 5, Tab. 1) mit 0,5 cm pro Sekunde Schneidgeschwindigkeit bei 5, 10, 15, 20 und 40μ Objekthub geschnitten. Anschließend wurde die Dicke der abgehobenen Schnitte bestimmt. Im Diagramm ist auf der Abszisse der eingestellte Objekthub (obere Linie) und die dazugehörige gemessene Schnittdicke (untere Linie) eingetragen, auf der Ordinate findet man die Messerablenkung inμ. Die obere Linie zeigt die Messerablenkung in Abhängigkeit vom eingestellten Objekthub, während die untere Linie die dazugehörigen jeweils gemessenen Schnittdicken miteinander verbindet. Die untere Linie zeigt also die Messerablenkung bei derjenigen Schnittdicke an, welche das Messer tatsächlich erfaßt hat. Die Schnittstauchung wurde hierbei nicht berücksichtigt.

b) Schneidgeschwindigkeit

Je größer die Schneidgeschwindigkeit gehalten wird, desto größer werden im untersuchten Bereich die Schneidkräfte und somit auch die Messerablenkung.

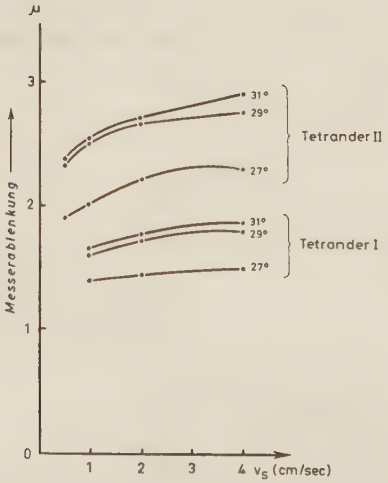

Abb. 10. Einfluß von Schneidgeschwindigkeit und Schnittwinkel auf die Messerablenkung.

Zur graphischen Darstellung dieses Zusammenhangs wurden einige Versuchsergebnisse herangezogen, welche am Mikrotom Tetrander II und I gewonnen wurden. Mit doppelt eingespanntem a-Messer (Nr. 1, Tab. 1) wurde mit jeweils 20 µ Objekthub bei verschiedenen Schneidgeschwindigkeiten geschnitten. Bei beiden Mikrotomen nimmt die Ablenkung mit steigender Schneidgeschwindigkeit zu. Außerdem ist klar zu erkennen, um wieviel besser die Werte bei dem stabileren Mikrotom Tetrander I sind. Die Versuche wurden außerdem mit verschiedenen Schnittwinkeln durchgeführt und dienen deshalb gleichzeitig als Illustration zu:

c) Schnittwinkel

Die für das Mikrotomschneiden gültigen Winkel sind in einer Übersicht (Abb. 11) dargestellt. Sie entsprechen den in den Mikrotomnachrichten der Firma JUNG, Heidelberg (Nr. 1/1958) üblichen Darstellungen.

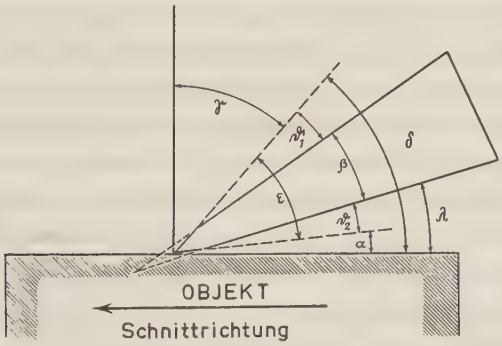

Abb. 11 Schema der in Frage kommenden Winkel

α = Freiwinkel
β = Keilwinkel
γ = Spanwinkel
δ = Schnittwinkel
ε = Schneidenwinkel
ϑ_1 = oberer Abzugswinkel
ϑ_2 = unterer Abzugswinkel
λ = Neigungswinkel

An den Messerhaltern der Mikrotome ist der Neigungswinkel des Messers gegen die Schneidebene meist einstellbar. Für die Versuchszwecke wurde diese Winkeleinteilung unter dem Mikroskop mit einem Okulargoniometer geeicht. Den sog. "Freiwinkel" α , d.i. die Neigung der unteren Schneidfacette gegen die Schneidebene, erhält man, indem man vom Neigungswinkel λ den unteren Abzugswinkel ϑ_2 abzieht. Dieser "Freiwinkel" ist von Bedeutung, weil er größer als 0° sein muß, da sonst die untere Schneidfacette auf das Objekt aufgleiten würde. Entscheidend für die Schneidkräfte ist dagegen der Schnittwinkel δ, das ist der Winkel zwischen oberer Schneidfacette des Messers und Schneidebene. Er setzt sich zusammen aus dem Neigungswinkel λ, dem Keilwinkel β und dem oberen Abzugswinkel ϑ_1. Leider waren oberer und unterer Abzugswinkel unter dem Mikrokop nicht zu bestimmen, weil die Messer an den Außenkanten abgerundet sind. Einer Veröffentlichung der Firma JUNG, Heidelberg, zufolge (Mikrotom-Nachrichten Nr. 1/1958) werden dort aber die Messer mit einem oberen und unteren Abzugswinkel von ca. 5° geschliffen, so daß auf diese Angaben zurückgegriffen werden konnte. Die auf diese Weise ermittelten Schnittwinkel sind in Abb. 10 an den Kurven eingetragen. Die zum Vergleich am Mikrotom Tetrander I unter den gleichen Versuchsbedingungen ermittelten niedrigeren und somit günstigeren Werte sind, wie schon gesagt , im wesentlichen auf die stabilere Ausführung von Messerhalter und Messerhalterträger zurückzuführen, da bei diesem Versuch die freie Messerlänge an beiden Mikrotomen gleichgehalten wurde. Man sieht also, daß die Messerablenkung mit zunehmendem Schnittwinkel ebenfalls zunimmt. Da ein großer Schnittwinkel, wie später noch gezeigt wird, außer einer unnötigen Erhöhung der Schneidkräfte noch andere Nachteile mit sich bringt, sollte der Schnittwinkel in der Praxis klein gehalten werden.

d) Einstellwinkel (Quer- oder Schrägmesser)

Eine weitere Untersuchung galt der Frage, welchen Einfluß eine Schrägstellung des Messers auf die Messerverformung hat. Zu diesem Zweck wurde der in Abb. 3 verwendete quadratische Celloidin-Paraffinblock quer montiert und mit 45° schräg eingestelltem Messer unter sonst gleichen Versuchsbedingungen geschnitten. Die Auslenkung der Messerschneide wurde wieder mit dem Direktschreiber registriert. Ein Vergleich der beiden Diagramme ergab einen annähernd gleichen Verlauf beider Kurven. Offenbar

ist hier für die Ablenkung nur die vom Messer gerade erfaßte Objektbreite maßgebend, welche ja bei beiden Versuchsanordnungen jeweils gleich ist. Die gemessene Schnittdicke betrug wie bei Abb. 3 an der zuerst und zuletzt vom Messer erfaßten Ecke 20 μ und in der Diagonale 25 μ . Das Ergebnis dieses Versuchs war überraschend ; man hätte eine geringere Ablenkung erwarten sollen und zwar aus folgenden Gründen :

1.) Durch die Schrägstellung des Messers bedingt, wird das Objektmaterial in der Scherzone nicht mehr mit dem eingestellten Schnittwinkel α auf die Spanfläche bzw. obere Schneidfacette heraufgeschoben, sondern mit einem effektiven Schnittwinkel α_1, für dessen Tangens die Formel Tangens $Delta_1$ = Tangens Delta mal Cosinus φ gilt, wobei $Delta_1$ den effektiven Schnittwinkel, Delta den eingestellten Schnittwinkel und φ den Einstellwinkel bedeutet, wenn man für das quereingespannte Messer φ = 0 setzt. Im vorliegenden Fall beträgt nach dieser Formel der effektive Schnittwinkel ca. 28° gegenüber einem eingestellten Schnittwinkel von 37°. Nach Abb. 10 wäre aber bei kleinerem Schnittwinkel auch eine geringere Ablenkung des Messers zu erwarten.

2.) Bei schrägeingespanntem Messer wirkt die Spitzenabrundung r nicht als Kreissegment sondern als Schrägprojektion desselben, also als Segment einer Elipse, deren entsprechender Krümmungsradius kleiner als r ist. Man schneidet demnach mit kleinerer funktioneller Spitzenabrundung, das Messer wirkt also schärfer.

e) Schmierung

Hat man - z.B. am LEITZ-Grundschlittenmikrotom - ein Objekt mit niedriger Schneidgeschwindigkeit und geringstem Objekthub angeschnitten, so kann der Fall eintreten, daß bei anschließendem schnellen Durchfahren des Schlittens trotz nicht erfolgten erneuten Objekthubs ein dünner Schnitt abgehoben wird. Der Schlitten muß sich also, lediglich durch die höhere Bahngeschwindigkeit bedingt, angehoben haben. Es ist naheliegend, für diesen Vorgang den Schmierfilm zwischen Schlitten und Schlittenbahn verantwortlich zu machen, welcher offenbar bei höherer Bahngeschwindigkeit weniger durch das Gewicht des Schlittens verdrängt wird.

Um den Einfluß der Schneidgeschwindigkeit auf die Dicke des Schmierfilmkissens zu ermitteln, wurde folgende Versuchsanordnung gewählt :

Auf dem Mikrotom Tetrander II wurde ein Celloidin-Paraffinblock mit möglichst stabil eingespanntem scharfen Messer plangeschnitten. Die Spitze des Meßtasters wurde genau in der Lage der Schneidebene angebracht (hier sind etwaige Unebenheiten der Schlittenbahn durch das vorherige Planschneiden kompensiert), wobei das Stativ des Meßtasters auf dem Messerhalterträger befestigt wurde. Das Messer wurde entfernt und der Meßtaster in Ruhelage des Schlittens auf die Objektoberfläche justiert. Beim Durchfahren des Objekts unter dem Meßtaster konnte anschließend das jeweils verschiedene Schlittenniveau als Ausdruck der wechselnden Schmierfilmdicke bei verschiedenen Bahngeschwindigkeiten ermittelt werden.

In den beiden Diagrammen Abb. 12 sind die Resultate dieser Messungen graphisch dargestellt, die obere Kurve gilt jeweils für reichliche Schmierung, die untere für normale Schmierung.

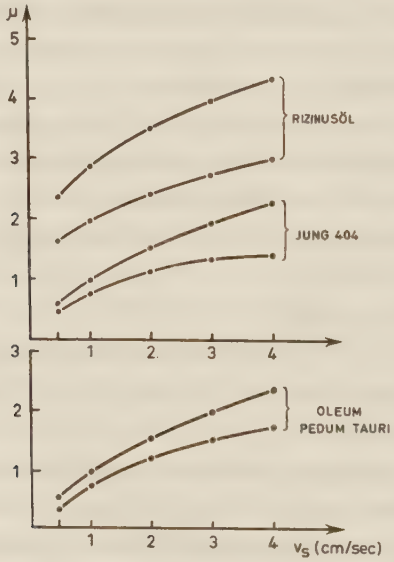

Abb. 12. Beeinflussung des Schmierfilmkissens durch die Schneidgeschwindigkeit bei einigen Schmiermitteln. Die jeweils untere Kurve eines Schmiermittels gilt für normale, die obere für reichliche Schmierung. Die Abszisse gibt die Schneidgeschwindigkeit in cm pro Sek., die Ordinate die Schmierfilmdicke in μ wieder.

Es ergibt sich, daß außer der Viscosität des Schmiermittels und der Schmiermittelmenge vor allem die Schneidgeschwindigkeit maßgebenden Einfluß auf die Schnittdicke hat. Der hierbei entstehende Fehler kann 2 µ betragen.

V. Messerseitige Faktoren

1. Stabilität und Schliffart des Messers

Für die Stabilität der Messer wurde von JERUSALEM der Index Rückendicke x 100 : Messerbreite angegeben. Mit steigendem Index wird das Messer steifer und gibt entsprechend weniger unter den Schnittkräften nach. Dieser Index gilt exakt nur für Keilmesser ohne Berücksichtigung einer Schwächung der Klinge durch stärkeren (a-Messer) oder schwächeren (b-Messer) Hohlschliff. Die Stabilität eines Messers nimmt also bei gleichem Index von a nach b nach c zu. Messer vom Schliff d lassen sich nur annäherungsweise mit diesem Index erfassen, ihre Stabilität liegt höher, als nach dem Index zu erwarten wäre.

2. Messerschärfe

Die Schärfe eines Schneidwerkzeugs ist definiert als Radius der Schneidenabrundung. Leider ließ sich die Schneidenabrundung mit den zur Verfügung stehenden Instrumenten nicht ermitteln. Um den Einfluß der Messerschärfe auf die Schnittdickenresultate zu prüfen, wurden auf dem LEITZ-MINOT-Mikrotom Schnittserien mit 10 µ Objekthub einmal mit einer scharfen und anschließend mit einer schon sehr häufig benutzten Stelle desselben Messers (d-Messer Nr. 7) geschnitten. Die Ergebnisse sind im folgenden Diagramm festgehalten (Abb. 13). Bei diesem Versuch wurde das Objekt lediglich vor Beginn der Serien mit einem Objekthub von 2 µ und weniger plangeschnitten, während bei den folgenden Schnitten der eingestellte Objekthub erfolgte. Ein Vergleich beider Kurven zeigt, daß das Übermaß des ersten Schnittes bei stumpfem Messer sehr viel größer ist als bei scharfem Messer, weil durch die größere Schneidkraft Messer und Objekt stärker verformt werden. Zudem fällt auf, daß außer der größeren Ungleichmäßigkeit die durchschnittliche Schnittdicke der ganzen Serie höher liegt als bei Verwendung eines scharfen Messers, obwohl der erfolgte gesamte Objekthub in beiden Fällen gleich ist. Diese Dickenzunahme kann bei gegebenem Schnittvolumen theoretisch nur mit einer Abnahme der Länge oder der Breite des Schnitts gegenüber den Blockmaßen erklärt werden. Praktisch kommt nur die Verringerung der

Schnittlänge durch Stauchung in Frage. Wir kommen damit zu:

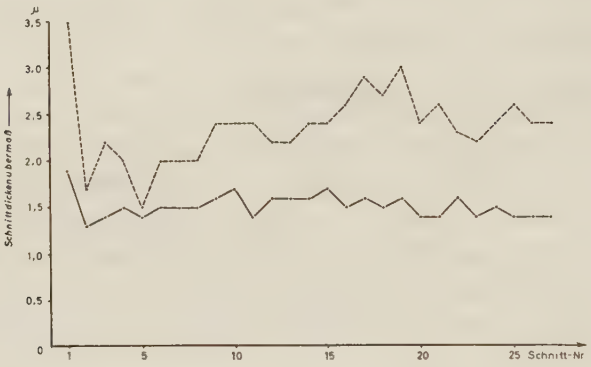

Abb. 13. Einfluß der Messerschärfe auf das Schnittdickenübermaß, sowie die Schnittdickenkonstanz in vergleichenden Schnittserien am LEITZ-MINOT-Mikrotom. Eingestellter Objekthub 10 μ. Auf der Ordinate gemessenes Schnittdickenübermaß in μ, auf der Abszisse die Schnittnummern. Obere Linie: Ergebnis bei stumpfem Messer, untere Linie: Ergebnis bei scharfem Messer.

VI. Durch den Zerspanungsvorgang direkt bedingte Ursachen

Schnittstauchung - Schnittverdickung

Folgende Beobachtung führt unmittelbar zu diesem Problem: Schneidet man einen Celloidin-Paraffinblock mit dünnsten Schnitten an und hebt dann einen Schnitt mit 20 μ Objekthub ab, so beginnt anschließend das Messer schon bei geringerem Objekthub wieder den Block zu fassen, als nach dem gemessenen Schnittdickenübermaß zu erwarten wäre. Mit anderen Worten: der abgehobene Schnitt ist bei seinem Aufgleiten auf die obere Schneidenfacette dicker geworden. Man bezeichnet diesen Vorgang in der Technik als Spandikkung. Die Ursache für diese Dickenzunahme liegt in der durch den Zerspanungsvorgang bedingten Spanstauchung. Vergleicht man in unserem Beispiel Objekt- und Schnittlänge miteinander, so findet man, daß der Schnitt kürzer geworden ist als der Block. Da aber Objekt- und Schnittbreite (bei Quermesser)

keinen Unterschied aufweisen, kann man schließen, daß es hier auch die Schnittstauchung ist, die zu einer Schnittverdickung geführt hat. Aus der Beobachtung, daß die Schnittstauchung beim d-Messer besonders stark in Erscheinung tritt, kann man schließen, daß ein Zusammenhang mit dem Schnittwinkel besteht, der ja, wie bereits erwähnt, beim d-Messer aus konstruktiven Gründen besonders groß sein muß.

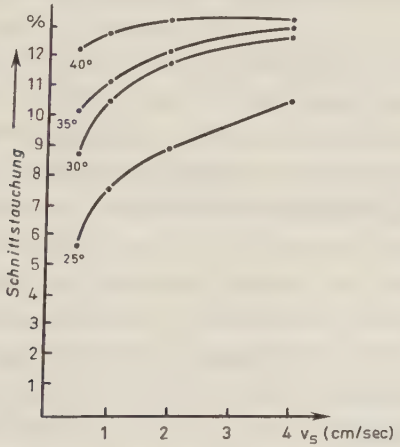

Abb. 14. Schnittstauchung in Abhängigkeit von Schnittwinkel und Schneidgeschwindigkeit. Die Abszisse gibt die Schneidgeschwindigkeit in cm pro Sek., die Ordinate die Schnittstauchung in % wieder. Objekthub 20 μ .

Das Diagramm (Abb. 14) belegt diese Feststellung: hier ist die Abhängigkeit der prozentualen Schnittstauchung von Schneidgeschwindigkeit und Schnittwinkel dargestellt. Die Schnittstauchung wurde als Durchschnittswert aus Schnittserien ermittelt, wobei innerhalb der Serien kein besonderes Anschneiden des Objekts vor jedem Schnitt erfolgte. Infolgedessen konnte aus diesen Serien auch die durchschnittliche Schnittverdickung ermittelt werden, die ein proportionales Verhalten zur erfolgten Schnittstauchung zeigte.

Bei der Untersuchung der Schnittstauchung in Abhängigkeit von der eingestellten Schnittdicke ergab sich die Schwierigkeit , daß dünne Schnitte stark gewellt wurden, so daß die eigentliche Schnittstauchung in Ermangelung einer Möglichkeit, die Schnitte richtig glatt zu bügeln, nicht genau genug gemessen werden konnte. Es entstand aber der Eindruck, als ob die Schnittstauchung mit abnehmender Schnittdicke zunimmt. Man ersieht aus dem Diagramm, daß die Schnittstauchung mit steigendem Schnittwinkel und mit steigender Schnittgeschwindigkeit zunimmt. Die Zusammenhänge zwischen der Schärfe des Messers und der Schnittstauchung wurden oben bereits erwähnt.

VII. Umweltbedingte Ursache, Temperatur

Temperaturveränderungen während des Schneidens sollten nach Möglichkeit vermieden werden, weil durch Wärmedehnung der Mikrotomteile und des Objekts die Schneidergebnisse in jedem Fall ungünstig beeinflußt werden. Bereits das Einschalten eines Beleuchtungskörpers in der Nähe des Mikrotoms führt zu einer meßbaren Wärmedehnung. Ebenso wirken sich Sonneneinstrahlung, ein offenes Fenster oder auch nur die eigene Körperwärme aus. Wird hingegen bei konstant hoher oder niedriger Temperatur geschnitten, so wirkt sich lediglich die veränderte Konsistenz des Objektmaterials und des Schmieroels aus und zwar in dem Sinne, daß bei höherer Temperatur die Schneidkräfte, besonders bei Paraffineinbettung abnehmen, und der Schmierfilm auf den Gleitbahnen infolge der größeren Dünnflüssigkeit des Oels geringer ausfällt.

VIII. Schnittserien

Bisher wurden im allgemeinen nur diejenigen Resultate geprüft, die sich ergaben, wenn das Objekt vor jedem Schnitt auf Schneidenhöhe angehoben wurde, d.h. wenn das durch den vorausgegangenen Schnitt bedingte Defizit vor dem eigentlichen Objekthub ausgeglichen wurde. Wird dagegen dieses Verfahren bei einer fortlaufenden Serie nur vor dem ersten Schnitt angewandt, so werden sich die Schnittdicken auf einen Mittelwert mit einer gewissen Streuung nach oben und unten einpendeln. Diese durchschnittliche Schnittdicke wird um das Maß der stauchungsbedingten Schnittverdickung über dem eingestellten Vorschub liegen, wenn ein grober Fehler in der Objektförderung des Mikrotoms ausgeschlossen werden kann. Im Interesse optimaler Schneidresultate ist es ratsam, sämtliche äußeren Einflüsse auf das Mikrotom nach Möglichkeit auszuschalten bzw. konstant zu halten. Dies betrifft ausser dem Temperatur-

einfluß und der Schneidgeschwindigkeit auch das Intervall zwischen den einzelnen Schnitten, da sich sonst die Objekthubverzögerung (s. oben) nachteilig auf die Schnittdickenkonstanz auswirken würde. Es kommt darauf an, nicht nur das Zeitintervall zwischen den einzelnen Schnitten, sondern auch die Zeitspanne zwischen Objekthub und Schnittbeginn konstant zu halten. In zuverlässiger Weise kann dieses Problem nur mit einem motorgetriebenen Serienschnitt-Mikrotom vom Typ MINOT gelöst werden, und zwar auch nur unter der Bedingung, daß man den Schlitten kontinuierlich laufen läßt, also ohne den zeitsparenden Kunstgriff, den Schlitten nach erfolgtem Schnitt zu beschleunigen und erst kurz vor dem nächsten Erreichen des Blocks wieder auf die eingestellte Schnittgeschwindigkeit abzubremsen.

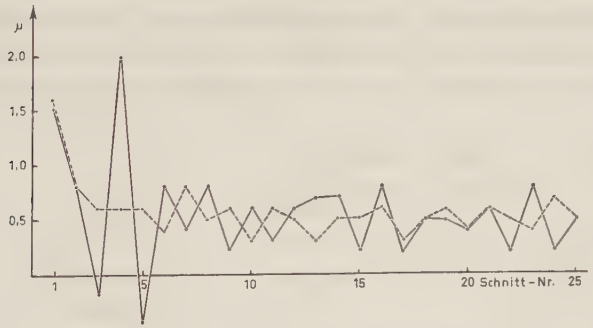

Abb. 15. Schnittdickenergebnisse aus zwei Serien am LEITZ-MINOT-Mikrotom bei 10 µ Objekthub und 0,5 cm pro Sek. Schneidgeschwindigkeit. Durchgezogene Linie : Diskontinuierlicher Lauf des Schlittens. Gestrichelte Linie : Dauerlauf des Schlittens.

In Abb. 15 sind zur Veranschaulichung die Schnittdickenergebnisse aus zwei Serien eingetragen, wobei die eine Serie mit kontinuierlich laufendem Schlitten(gestrichelt)geschnitten wurde, während bei der anderen,durchgezogenen nicht auf die Einhaltung gleicher Schneidintervalle geachtet wurde. Man erkennt, daß bei gleichmäßig laufendem Schlitten die Schnittdickenkonstanz besser ist.

Die Schnittdickenkonstanz verschiedener Mikrotome kann man nur dann miteinander vergleichen, wenn sämtliche Einstelldaten beim Schneiden gleich gehalten werden. Es hat daher wenig Sinn, die Ergebnisse z.B. des LEITZ-MINOT-Mikrotoms mit seiner konstruktiv gegebenen freien Messerlänge von 64 mm mit denen des LEITZ-Grundschlittenmikrotoms mit seiner doppelt so großen freien Messerlänge zu vergleichen, weil dabei das LEITZ-Grundschlittenmikrotom von vornherein im Nachteil sein muß. Bei den folgenden Versuchen wurde daher die freie Messerlänge an den Tetrandermodellen jeweils auf das zum Vergleich herangezogene Mikrotom abgestimmt. Es wurde immer mit demselben Messer geschnitten (c-Messer, Nr. 6), lediglich bei dem Vergleich zwischen LEITZ-MINOT-Mikrotom und JUNG 1120 mot war dies nicht möglich, weil der Rücken des Versuchsmessers nicht in den Messerhalter des 1120 mot paßte. Überhaupt ergaben sich bei diesem Mikrotom Schwierigkeiten, weil mit passenden dünneren Keilmessern bei dem verwendeten Celloidin-Paraffin-Material das Auftreten von Rattermarken nicht zu vermeiden war, so daß auf ein d-Messer (Nr. 7, Tab. 1) zurückgegriffen werden mußte.

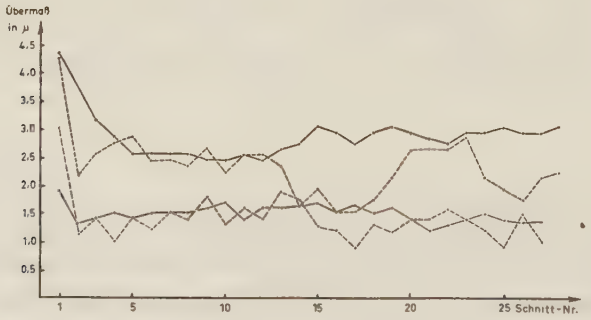

Abb. 16. Schnittdickenübermaße bei Schnittserien mit dem LEITZ-MINOT-Mikrotom (durchgezogene Kurve) und dem JUNG 1120 mot (gestrichelte Kurve) bei 20 µ Objekthub (oberes Kurvenpaar) und 10 µ Objekthub (unteres Kurvenpaar).

Einen Überblick über die gemessenen Schnittdickenschwankungen gibt das Diagramm Abb. 16, in dem die x-Achse, auf der die laufenden Schnittnummern eingetragen sind , mit der Linie des eingestellten Objekthubs zusammenfällt, während auf der Ordinate das Schnittdickenübermaß erscheint. Als Maß für die Streuung in den jeweiligen Schnittserien wurde die Standardabweichung der Schnittdicken ermittelt, und zwar je einmal über die ganze Serie und einmal nach Ausklammerung der ersten fünf Schnitte, nach denen sich die anfänglichen groben Dickenschwankungen erfahrungsgemäß einigermaßen eingependelt haben.

Objekthub	Standardabweichung	LEITZ - MINOT	JUNG 1120 mot	JUNG Tetrander I	JUNG Tetrander II
10 µ	s	0,25	0,41	0,44	0,42
	s_1	0,23	0,26	0,36	0,25
20 µ	s	0,84	0,55	0,71	0,66
	s_1	0,17	0,40	0,32	0,25

		LEITZ-Grundschlittenmikrotom	JUNG Tetrander I	JUNG Tetrander II
10 µ	s	0,52	0,61	0,58
	s_1	0,24	0,23	0,32
20 µ	s	1,58	0,75	0,94
	s_1	1,09	0,34	0,28

Tab. 3 . Standardabweichung der Schnittdicken bei Schnittserien. Obere Tabelle bei einer freien Messerlänge von 64 mm ; untere Tabelle bei einer freien Messerlänge von 128 mm.

s = Standardabweichung bei 25 Schnitten, einschließlich der ersten fünf.

s_1 = Standardabweichung derselben Serie unter Fortlassung der ersten fünf Schnitte.

Wie man der Tab. 3 entnehmen kann, schneiden unter den hier untersuchten Mikrotomen die Mikrotome vom Typ MINOT am besten ab. Dieses Ergebnis ist nach den bisherigen Überlegungen wenig überraschend, denn

erstens bietet dieses Konstruktionsprinzip stabilitätsmäßig sehr günstige Voraussetzungen, weil a) der Messerhalter und seine Befestigung sehr stabil ausgeführt sind und b) die auftretenden Schneidkräfte ohne Umweg direkt auf die Grundplatte übertragen werden. Zweitens können bei dieser Konstruktion völlig gleiche Schneidintervalle eingehalten werden, vorausgesetzt, man läßt den Schlitten kontinuierlich laufen. Drittens sind die mechanischen Einflüsse auf das Mikrotom sehr stark reduziert, weil man das Gerät nur zur Schnittabnahme berühren muß, wobei dieser Einfluß bei entsprechender Vorsicht vernachlässigt werden kann. Bei den anderen Mikrotomen mußte die Rückführung des Schlittens nach dem Schnitt von Hand durchgeführt werden, wodurch sich zwangsläufig unterschiedliche zusätzliche Kräfte ergaben, die auf das Gerät einwirkten. Schon durch das immer wieder nötige Anfahren des Schlittens wird wegen der hohen Haftreibung das Mikrotom jedes Mal in sich verwunden. Auch die Schneidintervalle konnten bei diesem Verfahren trotz Verwendung einer Stoppuhr nicht so genau eingehalten werden. Um diese Nachteile zu umgehen, könnte man auch die normalen Schlittenmikrotome mit einem Antriebsmotor ausrüsten, der über einen Kurbeltrieb den Schlitten mit einer Zugstange hin- und herbewegt. Hierbei wäre es vorteilhaft, die Zugstange in einem Zwischenlager zu unterteilen, so daß - ähnlich wie bei dem Kreuzkopf einer Dampfkolbenmaschine - der Seitenschub, der sich aus dem seitlichen Auswandern des Kurbelzapfens ergibt, vom Schlitten ferngehalten wird. An vorhandenen Baueinheiten könnte man den Antriebsmotor des JUNG 1120 mot samt Riemenscheibe und Riemen verwenden, womit eine genügend elastische Kraftübertragung (Vermeidung von Resonanzschwingungen im Mikrotom) erreicht wäre. Um den Hub der Länge der verschiedenen Schlittenbahnen anzupassen, könnte man die Kurbelwangen mit je einer radialen Schlitzführung versehen, in welcher der Kurbelzapfen auf die gewünschte Hub- bzw. Bahnlänge festgeklemmt werden könnte. Mit dieser einfachen Einrichtung wäre eine Möglichkeit gegeben, jedes mit automatischem Vorschub ausgerüstete Schlittenmikrotom in ein "Serienschnitt-Mikrotom" zu verwandeln. Ein prinzipieller Nachteil eines jeden Kurbeltriebs besteht lediglich darin, daß die Bahnbewegung zwischen den Totpunktlagen oscilliert, man erhält also eine ungleichförmige Bahngeschwindigkeit, was wegen der dadurch bedingten Schneidkraft- und Schmierfilmveränderungen prinzipiell unerwünscht ist. Allerdings lassen sich diese Fehlereinflüsse, wie das Beispiel des LEITZ-MINOT-Mikrotoms zeigt, durch eine

Position des Objekthalters symmetrisch zur Mitte der Schlittenbahn, wo die Geschwindigkeitsdifferenzen am geringsten sind, reduzieren.

IX. Zusammenfassung

Die Anwendung quantitativer Untersuchungsmethoden in der Histologie setzt zuverlässige Maßhaltigkeit der Schnitte voraus. Schnittdickenmessungen mit einem elektronischen Längenmeßgerät ergaben jedoch erhebliche Abweichungen (im Extrem 100 %) von den am Mikrotom eingestellten Werten. Diese Abweichungen werden durch die auftretenden Schneidkräfte und durch die mechanischen Gegebenheiten an den Mikrotomen verursacht. Unter den beim Schnitt wirkenden Kräften interessiert besonders eine als Ablekkraft bezeichnete Komponente, die sowohl die Messerschneide objektwärts als auch das Objekt messerwärts zu bewegen bestrebt ist. Als Resultat dieser Ablenkkraft wird die Ablenkung der Messerschneide mit einem elektronischen Meßgerät gemessen. Wie in verschiedenen Versuchen gezeigt werden kann, steigt diese Messerablenkung mit folgenden Faktoren:

1) Zunehmende Konsistenz des Objektmaterials
2) Zunehmende Objektbreite
3) Zunehmender Objekthub
4) Zunehmende Schnittgeschwindigkeit
5) Zunehmende Schnittwinkel
6) Abnehmende Messerschärfe.

Werden diese Faktoren und somit die Schneidkraft konstant gehalten, so wird die Messerablenkung noch durch folgende Faktoren beeinflußt:

7) Stabilität und Schliffart des Messers. Als Maß für die Stabilität des Messers wird von JERUSALEM der Index = Rückendicke x 100 : Messerbreite angegeben, wobei mit steigendem Index das Messer stabiler wird und weniger unter der Schnittkraft nachgibt.
8) Freie Messerlänge. Bei kurzem Abstand der Einspannbacken wird das Messer weniger verformt als bei großem Abstand der Messerhalter. Sehr ungünstige Verhältnisse ergeben sich bei einseitiger Messereinspannung, wo das Schnittdickenübermaß bis zu 100 % betragen kann.

Maßgeblich für die Annäherung des Objekts an das Messer bei gegebener Schneidkraft sind der Elastizitätsmodul des Objekt- und Einspannblockmaterials

sowie die Abmessungen von Objekt und Einspannblock. Beim Schneiden werden nicht nur Messer und Objekt verformt, sondern auch Messerhalter und Objekthalter samt ihren Verankerungen. Dabei kann an horizontal arbeitenden Schlittenmikrotomen, bei denen die auf den Schlitten wirkende Schwerkraft ein Vielfaches der Ablenkkraft beträgt, der Schlitten in sich elastisch verformt werden, während bei vertikalen Schlittenbahnen (z.B. MINOT-Mikrotome) der ganze Schlitten folgt.

Eine elastische Verformung des Objekthubmechanismus zeigt sich in der Objekthubverzögerung. Sie besteht darin, daß der volle Objekthub u.U. erst nach 25 Sekunden erreicht wird.

Weiterhin werden die Zusammenhänge zwischen der Schlittengeschwindigkeit und der Dicke des Ölfilms auf den Schlittenbahnen bei verschiedenen Schmiermitteln untersucht. Weitere Untersuchungen gelten der Frage der Schnittstauchung:

Bei der Zerspanung erfährt der abgehobene Schnitt eine Längsverkürzung oder Stauchung, welche von einer Dickenzunahme begleitet wird, die als Schnittverdickung bezeichnet wird. Diese Schnittstauchung nimmt mit steigendem Schnittwinkel und steigender Schneidgeschwindigkeit zu.

Abschließend wird die Schnittdickenkonstanz an verschiedenen Mikrotomen untersucht, wobei als Maß die Standardabweichung innerhalb der einzelnen Serien errechnet wird. Die Gründe für die verhältnismäßig guten Ergebnisse an den MINOT- Mikrotomen bei diesem Vergleich werden näher erläutert.

X. Literaturangaben

JERUSALEM, Chr. : Über die Schnittdickeninkonstanz, Folge I. Die Deformation des Mikrotommessers. Unveröffentlichtes Manuskript.

JUNG (Firma), Heidelberg: Die Bedeutung der Messerneigung beim Schneiden. Mikrotomnachrichten Heft 1 1958, S. 2-5.

PIISPANEN, Väinö : Theorie der Metallspanbildung. Journ. of Appl., Physics. Vol. 19, Nr. 10, 1948, S. 876.

ROMEIS, B. : Mikroskopische Technik, 16. Aufl. 1968.

Lebenslauf

Am 30. September 1938 wurde ich, Hans Jasper Feneis, in München als Sohn des damaligen Universitätsassistenten Dr. med. Heinz Feneis und seiner Ehefrau Ida, geb. Pries geboren. In Tübingen besuchte ich die Grundschule und anschließend das Uhland-Gymnasium, an welchem ich am 16. III. 1957 die Reifeprüfung ablegte.

Anschließend studierte ich an der Universität Tübingen fünf Semester Medizin und legte am 27. Oktober 1959 die Ärztliche Vorprüfung mit der Note " gut " ab. Nach dem ersten klinischen Semester in Kiel (W.S. 59/60) war ich vom 1. April 1960 bis zum 31. März 1962 Soldat bei der Bundesmarine und wurde als Leutnant zur See entlassen.

Nach je einem weiteren klinischen Semester in Kiel und Hamburg ging ich zurück nach Tübingen, wo ich nach weiteren 4 Semestern am 14. Juli 1965 die Ärztliche Prüfung mit der Note " gut " ablegte.

Die ersten 10 Monate meiner Pflichtzeit als Medizinalassistent leistete ich am Anatomischen Institut der Universität Tübingen ab, anschließend ging ich vom 1. November 1966 bis zum 13. März 1967 an die Chirurgische Abteilung des Kreiskrankenhauses Hechingen zur Ableistung meiner chirurgischen Pflichtzeit. Vom 15. März 1967 bis zum 30. September 1967 arbeitete ich als Medizinalassistent auf der Inneren Abteilung des Krankenhauses Radolfzell, vom 22. November 1967 bis zum 31. März 1968 ebenfalls als Medizinalassistent an der Universitätsfrauenklinik Tübingen.

Mit Wirkung vom 21. März 1968 wurde mir die Bestallung als Arzt erteilt. Seit dem 1. April 1968 arbeite ich als Assistenzarzt am Kreiskrankenhaus Hechingen, wo ich die ersten drei Jahre meiner Chirurgischen Facharztausbildung ableiste.